

## **Численное моделирование динамики связанных магнитных вихрей в мультислойных проводящих наноцилиндрах**

**Левашова Ирина Андреевна**

*Мухамадеева Виктория Владимировна, Степанов Станислав Викторович, Антонов Георгий Игоревич*

*Башкирский государственный университет*

*Екомасов Евгений Григорьевич, д.ф.-м.н.*

*[irina.levashova2013@gmail.com](mailto:irina.levashova2013@gmail.com)*

Большое внимание, в настоящее время, привлекают исследования вихревых решений Обобщенного уравнения Ландау-Лифшица [1-3]. Наличие в этом уравнении слагаемого, учитывающего взаимодействие намагниченности и спин-поляризованного тока, позволяет исследовать процессы переключения и возбуждения осцилляций намагниченности в магнитных наноструктурах с помощью тока и внешнего магнитного поля. Интересны для рассмотрения, в этом плане, микроволновые спин-трансферные наноосцилляторы (СТНО). Большинство таких структур имеют два магнитных слоя, разделенных немагнитной прослойкой. Одной из наиболее перспективных разновидностей СТНО, является вихревая структура, в которой магнитный вихрь реализуется как основное состояние в ферромагнитных слоях. Появилось много экспериментальных и теоретических работ, посвященных исследованию динамики магнитостатически связанных магнитных вихрей (см., например, [2-3]). Показано, что для системы из двух взаимодействующих магнитных дисков, находящихся в вихревом состоянии, спектр колебаний магнитных вихрей может кардинально измениться. Также экспериментально найдена зависимость величины магнитного поля переключения полярности каждого из вихрей от величины поляризованного тока.

С помощью микромагнитного пакета SPINPM проведено исследование динамики и структуры двух дипольно связанных магнитных вихрей в трехслойном наностолбике большого диаметра (400 нм), под действием внешнего магнитного поля и спин-поляризованного электрического тока. Показана возможность существования различных режимов движения вихрей, в зависимости от величины поляризованного тока и магнитного поля. Для случая стационарной динамики связанных магнитных вихрей, найдена зависимость частоты их колебаний от величины тока. Показана возможность управления частотой стационарного движения вихрей и подстройки амплитуды управляющих токов с помощью внешнего магнитного поля. С помощью аналитического метода, для упрощенного описания динамики связанных вихрей, получены зависимости частоты от величины тока и внешнего магнитного поля, качественно совпадающие с численными результатами. Построена зависимость величины магнитного поля, разделяющего переключательную полярность вихрей от величины спин-поляризованного тока. Показано, что динамический и квазистатический сценарии переключения полярности вихря имеют место при различных значениях поля/тока. Проведено сравнение динамики двух дипольно связанных магнитных вихрей в трехслойном наностолбике большого диаметра.

Работа поддержана грантом РФФИ, проект № 19-02-00316/19.

Список публикаций:

[1] Звездин А.К., Звездин К.А., Хвальковский А.В. // УФН. 178, 436 (2008).

[2] Locatelli N., Ekomasov A.E., Khvalkovskiy A.V. and et. el., *Applied Physics Letters*. 102, 062401 (2013)

[3] Екомасов А.Е., Степанов С.В., Екомасов Е.Г., Звездин К.А., *Физика металлов и металловедение*. 118, 345 (2017).

[4] A.E.Ekomasov, S.V.Stepanov, E.G.Ekomasov, K.A.Zvezdin, *JMMM* Volume 471, 1 February 2019, Pages 513-520. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2018.09.077>

## **Датчик тока на основе самонамагничивающейся структуры LiNbO<sub>3</sub>/Ni/Metglas**

**Леонтьев Виктор Сергеевич**

*Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого*

*Бичурин Мирза Имамович, д.ф.-м.н.*

*[Viktorsergeevich.novsu@gmail.com](mailto:Viktorsergeevich.novsu@gmail.com)*

Датчики тока являются очень важным типом устройств. Существует большое количество датчиков тока, работающих на основе различных физических явлений. Наиболее распространенными являются такие датчики, как трансформатор тока, магниторезистивные и датчики Холла [1]. Несмотря на то, что магнитоэлектрические (МЭ) датчики тока имеют небольшие размер и вес, а также высокую чувствительность, в публикациях уделялось мало внимания их сравнению с МЭ датчиками магнитного поля [2]. Также на сегодняшний день отсутствуют МЭ датчики тока, готовые к практическому использованию.

Для улучшения выходных характеристик МЭ датчика тока, предлагается использовать в качестве чувствительного элемента композит на основе градиентной бидоменной структуры LiNbO<sub>3</sub> / Ni / Metglas.

Известно [1], что использование градиентных структур в магнитострикционно-пьезоэлектрических композитах делает возможным использование градиента намагниченности для создания самонамагничивающейся структуры путем замены внешнего магнитного поля на внутреннее, что может значительно уменьшить вес и габариты устройства. Ранее был рассмотрен датчик тока на основе магнитострикционно-пьезоэлектрического композита Metglas-PZT-Metglas [2] с использованием внешнего магнитного поля 15 Э. В случае использования в качестве чувствительного элемента датчика тока на основе градиентной бидоменной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  со следующими расчетными толщинами слоев: ниобат лития - 0,5 мм, никель - 300 нм, Metglas - 29 мкм, отпадает необходимость во внешнем магнитном поле, и в результате снижения шума конструкции увеличивается чувствительность устройства. Дополнительным преимуществом датчиков тока на основе ниобата лития является отсутствие свинцового компонента в устройстве. Предварительные оценки показывают, что МЭ коэффициент в предлагаемой структуре равен  $500 \text{ В}/(\text{см} \cdot \text{Э})$ , эквивалентный уровень магнитного шума  $120 \text{ пТ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$  при 10 Гц и чувствительности  $300 \text{ нВ} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$  при 10 Гц. Исследование показывает, что градиентные бидоменные структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  могут быть использованы в качестве элемента для создания высокочувствительных самонамагничивающихся датчиков токов и магнитных полей.

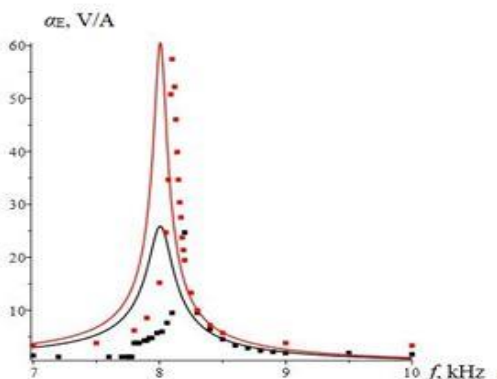


рис.1. Зависимость МЭ коэффициента по напряжению от частоты без поля подмагничивания. Сплошная линия – теоретическая зависимость, черные точки – экспериментальная зависимость структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Metglas}$ , красные точки – экспериментальная зависимость градиентной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$ .

Как видно из рис. 2, чувствительность достигает значения 0,41 В/А (без использования усилителя). Результаты показывают высокую практическую значимость для прикладных применений.

Использование этой градиентной бидоменной структуры позволит значительно снизить уровень магнитного шума, повысить чувствительность, а также уменьшить габаритные размеры устройства, поскольку нет необходимости использовать постоянный магнит и усилитель.

Значение МЭ коэффициента по напряжению для образца  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  составляет  $\alpha_{\text{ME}} = 57.4$  без поля смещения. Показано, что значение МЭ коэффициента по напряжению без поля смещения в образце  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  значительно выше, чем в структуре  $\text{LiNbO}_3 / \text{Metglas}$ .

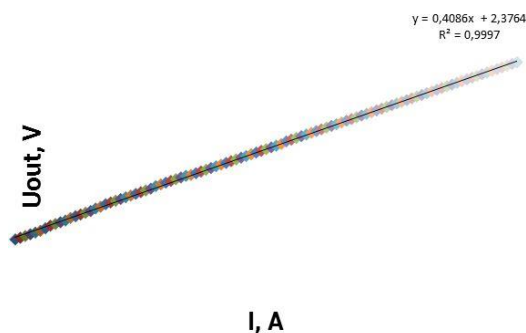


рис.2. Выходная зависимость МЭ датчика тока.

Полученные результаты открывают широкие возможности для практического применения градиентной бидоменной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  в качестве чувствительного элемента для разработки высокочувствительных датчиков тока и магнитного поля.

Предлагаемый датчик тока может использоваться в измерительной технике, в электрических сетях и системах управления, системах безопасности; в металлоискателях; в автомобильной промышленности; на железнодорожном транспорте; в беспроводных системах учета; в космической технике и робототехнике; в медицине.

Преимуществами датчика тока на основе бидоменной градиентной структуры  $\text{LiNbO}_3 / \text{Ni} / \text{Metglas}$  являются высокая чувствительность, низкое энергопотребление, большой диапазон выходного напряжения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-57-53001.

Список публикаций:

[1] *Modern Sensors Handbook* R.Pavel, T. Alois., Eds.; ISTE Ltd, 2007, 518p.

[2] M.I. Bichurin, V.M. Petrov, R.V. Petrov, A.S. Tatarenko. *Magnetoelectric Composites*. Pan Stanford Publ., Singapore, 2019, 280p.

## Моделирование сплит-кольцевого резонатора со структурой метаматериалов с ферритовым элементом

Лобекин Вячеслав Николаевич

Лаврова Ирина Германовна

Новгородский государственный университет имени Ярослава Мудрого

Татаренко Александр Сергеевич, к.т.н.

[slavalobekin@gmail.com](mailto:slavalobekin@gmail.com)

В последнее время многие устройства и компоненты с улучшенными характеристиками были разработаны и исследованы на основе структур со свойствами метаматериалов. Основой таких устройств являются резонаторы, в частности, сплит-кольцевые резонаторы с узким зазором (SRR). Эти новые компоненты определены как устройства со свойствами метаматериалов. Преимущества этих резонаторов или элементов на их основе заключаются в их очень маленьком субволновом размере, что обеспечивает возможность создания компактной схемы и таких компонентов, как фильтры. Метаматериалы - это инженерные материалы, которые демонстрируют контролируемые электромагнитные характеристики, не встречающиеся в природе. Предмет метаматериалов привлек большое внимание к исследованиям от сверхвысоких до высоких терагерцевых и оптических частот, и многие устройства с новыми или улучшенными функциональными возможностями разработаны на основе концепции искусственного материала [1-3].

В данной работе рассматривается структура на основе сплит-кольцевого резонатора с добавлением ферритового элемента. Включение ферритового элемента позволяет осуществить электронную перестройку резонансных характеристик с помощью магнитного поля.

Для моделирования выбрана структура сплит-кольцевого резонатора со свойствами метаматериалов с ферритовым элементом ЖИГ, представленная на *рис. 1*. Конструкция выполнена на подложке Duroid 6010.2LM размерами 30x24 мм и толщиной 1,90 мм, с относительной диэлектрической проницаемостью 10,2 и тангенсом угла диэлектрических потерь 0,0023. Микрополосковая линия передачи является элементом возбуждения с волновым сопротивлением 50 Ом, сплит-кольцевой резонатор и заземление выполнено из меди с толщиной металлизации 0,035 мм [4]. В качестве ферритового элемента используется железо-иттриевый гранат.

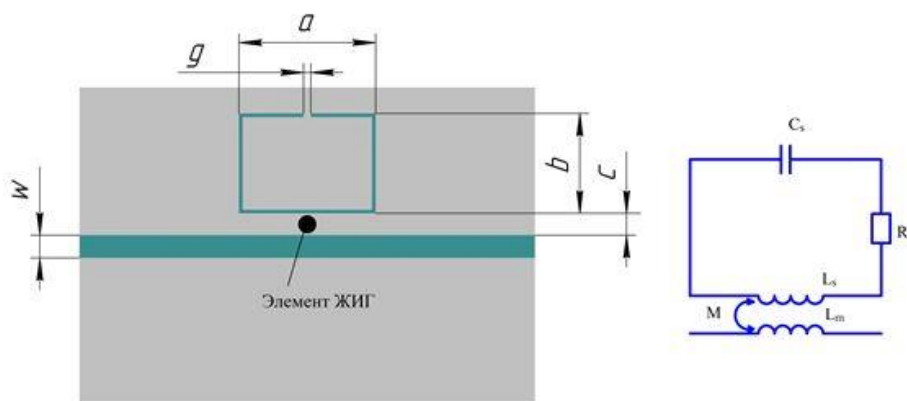


рис 1. – Структура сплит-кольцевого резонатора на основе метаматериалов с ферритовым элементом:  $a=7$  мм,  $b=7.5$  мм,  $w=1.7$  мм,  $c=0.65$  мм,  $g=0.15$  мм.

Компьютерное моделирование проводилось в программе ANSYS HFSS, являющейся инструментом для трехмерного моделирования ВЧ/СВЧ электромагнитных полей. Технология HFSS позволяет выполнять расчет электрических и магнитных полей, токов, S параметров и излучений. Процесс выполнения расчета полностью автоматизирован, пользователю необходимо задать геометрические параметры, свойства материалов и